

Технічні науки

УДК 622.692.4

**Середюк Марія Дмитрівна**

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри  
транспорту і зберігання нафти і газу

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

**Григорський Станіслав Ярославович**

кандидат технічних наук, асистент кафедри  
транспорту і зберігання нафти і газу

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

**Середюк Мария Дмитриевна**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
транспорта и хранения нефти и газа

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

**Григорский Станислав Ярославович**

кандидат технических наук, ассистент кафедры  
транспорта и хранения нефти и газа

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

**Serediuk M.**

doctor of technical sciences, professor, head of department  
department of transport and storage of oil and gas  
Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas

**Grygorskyi S.**

PhD, assistant lecturer,  
department of transport and storage of oil and gas  
Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ НАСОСІВ З  
РЕГУЛЬОВАНИМ ПРИВОДОМ ЗА НЕПОВНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ  
НАФТОПРОВОДУ**

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НАСОСОВ С  
РЕГУЛИРУЕМЫМ ПРИВОДОМ ПРИ НЕПОЛНОЙ ЗАГРУЗКЕ  
НЕФТЕПРОВОДА**

**EFFICIENCY OF USING PUMPS WITH ADJUSTABLE DRIVE FOR  
PART-LOADED OIL PIPELINE**

**Анотація:** Досліджено можливий діапазон регулювання та енергоефективність застосування регульованого приводу насосів на прикладі експлуатаційної ділянки магістрального нафтопроводу, що працює зі значним недовантаженням. Розглянуто випадки використання насосів з регульованим приводом як на одній, так і на всіх нафтоперекачувальних станціях нафтопроводу.

**Ключові слова:** нафтоперекачувальна станція (НПС), насосний агрегат, регульований привод, пропускна здатність, питомі витрати електроенергії, енергоефективність.

**Аннотация:** Исследован возможный диапазон регулирования и энергоэффективность применения регулируемого привода насосов на примере эксплуатационного участка магистрального нефтепровода, работающего со значительной недогрузкой. Рассмотрены случаи использования насосов с регулируемым приводом на одной и на всех нефтеперекачивающих станциях.

**Ключевые слова:** нефтеперекачивающая станция (НПС), насосный агрегат, регулируемый привод, удельный расход электроэнергии, энергоэффективность.

**Summary:** The possible range of adjustment and energy efficiency for the application of regulated drives for pumps were studied based on the example of operational main oil pipeline segment, which has significant part load. Cases using pumps with regulated drives on one and on all as well oil pumping stations of oil pipeline were investigated.

**Keywords:** oil pumping station (OPS), pumping unit, regulated drive, flow capacity, specific power consumption, energy efficiency.

Енерговитратність трубопровідного транспорту нафти визначається енергоефективністю експлуатації магістральних насосних агрегатів, які встановлені на НПС магістральних нафтопроводів. Нафтові насосні агрегати – це потужні відцентрові насоси з електричним приводом. До сьогодні на магістральних нафтопроводах України використовували насосні агрегати, що працюють зі сталою обертовою частотою. Експлуатація таких насосних агрегатів, особливо, за несталою, неповного завантаження нафтопроводів, ускладнює регулювання обсягів транспортування нафти у широкому діапазоні витрат. Об'єктивно для зменшення витрати нафти приходиться реалізувати режими перекачування, що супроводжуються значним дроселюванням, тобто знищенням на вузлі регулювання частини енергії, що створена насосами. Це призводить до зростання енерговитрат на транспортування нафти [1, 2, 3, 4].

У світовій практиці у сфері нафтопостачання широкого застосування набули насосні агрегати з регульованим електричним приводом. Оскільки вітчизняні магістральні нафтопроводи працюють з неповним завантаженням, можна прогнозувати, що використання зазначеної прогресивної технології також може бути доцільним для певних елементів нафтотранспортної системи.

Нами удосконалено методику математичного моделювання характеристик нафтових насосів за умов зміни обертової частоти у широкому діапазоні. Запропоновані математичні моделі можуть слугувати основою дослідження енергоефективності застосування насосних агрегатів з регульованим приводом на конкретних нафтопровідних системах.

Метою досліджень є визначення енергоефективності використання насосних агрегатів з регульованим приводом на магістральному нафтопроводі, що працює зі значним недовантаженням.

У процесі досліджень вирішувались такі задачі:

- 1) встановлення можливого діапазону зміни робочої витрати нафти у разі встановлення насосного агрегату з регульованим приводом по чергово на кожній НПС ділянки нафтопроводу;
- 2) визначення загального обсягу дроселювання та питомих витрат електроенергії для різних значень обертової частоти у разі встановлення насосного агрегату з регульованим приводом по чергово на кожній НПС ділянки нафтопроводу;
- 3) встановлення можливого діапазону зміни робочої витрати нафти у разі встановлення насосного агрегату з регульованим приводом на всіх НПС ділянки нафтопроводу;
- 4) визначення загального обсягу дроселювання та питомих витрат електроенергії для різних значень обертової частоти у разі встановлення насосного агрегату з регульованим приводом на всіх НПС ділянки нафтопроводу;
- 5) розроблення рекомендацій щодо енергоефективності застосування насосних агрегатів з регульованим приводом на НПС нафтопроводу, що працює зі значним недовантаженням.

Нами розроблено методику, яка дає змогу для будь-якої комбінації працюючих насосів, у тому числі з регульованим приводом, визначити пропускну здатність нафтопроводу, величину вимушеного дроселювання,

загальні витрати потужності та питомі витрати електроенергії на транспортування нафти.

Базуючись на часткових формулах подібності відцентрових машин, запропоновані такі математичні моделі для характеристик нафтових насосів за довільного значення відносної обертової частоти вала  $\gamma = n/n_n$  :

- напірної

$$H = \gamma^2 a + \gamma b Q + c Q^2 + \gamma^{-1} d Q^3, \quad (1)$$

- коефіцієнта корисної дії (ККД)

$$\eta = \gamma^{-1} c_1 Q + \gamma^{-2} c_2 Q^2 + \gamma^{-3} c_3 Q^3, \quad (2)$$

де  $Q$  - робоча подача насоса;

$n$  - робоче значення обертової частоти вала насоса;

$n_n$  - номінальне значення обертової частоти вала насоса;

$a, b, c, d$  - коефіцієнти математичної моделі напірної характеристики насоса за номінального значення обертової частоти вала насоса;

$c_1, c_2, c_3$  - коефіцієнти математичної моделі кривої ККД насоса за номінального значення обертової частоти вала насоса.

При зменшенні обертової частоти вала спостерігається деяке зниження ККД насоса внаслідок зменшення числа Рейнольда і зростання впливу механічних втрат енергії у підшипниках. Тому методикою передбачається коригування ККД насоса відповідно до формули фірми Sulzel [5]

$$\eta' = \frac{\eta}{\eta + (1 - \eta)\gamma^{-0,17}}. \quad (3)$$

Потужність насосного агрегату за робочої подачі  $Q$  та відносної обертової частоти  $\gamma$  може бути обчислена за формулою

$$N_{на} = \frac{\rho g Q (\gamma^2 a + \gamma b Q + c Q^2 + \gamma^{-1} d Q^3)}{\eta' \eta_e}, \quad (4)$$

де  $\rho$  - розрахункова густина транспортованої нафти;

$\eta_e$  - ККД електродвигуна – приводу насоса.

Блок математичного моделювання лінійної частини нафтопроводу передбачає використання гідродинамічних формул для визначення загальних втрат тиску при русі реальної рідини в трубопроводі. Для обчислення коефіцієнта гідравлічного опору використано модифіковану універсальну формулу Колбрука [6].

Пропускна здатність нафтопроводу довільної конфігурації визначають методом ітерацій за витратою нафти, перевіряючи виконання умов матеріального та енергетичного балансу для кожного елемента системи. Задають значення витрати нафти, значно менше за розв'язок, і по чергово прораховують параметри роботи кожної НПС і прилеглої ділянки нафтопроводу. На кожній проміжній НПС перевіряють виконання технологічних обмежень тиску

$$P_{вх_i} > P_{min_i}, \quad (5)$$

$$P_{вих_i} < P_{max_i}, \quad (6)$$

де  $P_{вх_i}, P_{вих_i}$  - тиск нафти на вході та виході  $i$ -ої НПС відповідно;

$P_{min_i}$  - мінімально допустимий тиск нафти на вході  $i$ -ої НПС, що забезпечує роботу насосів без кавітації;

$P_{max_i}$  - максимально допустимий тиск нафти на виході  $i$ -ої НПС, що забезпечує міцність трубопроводу.

За виконання для всіх проміжних НПС умов міцності та безкавітаційної роботи магістральних насосів знаходять тиск нафти у кінці нафтопроводу  $P_k$ . Якщо розраховане значення кінцевого тиску перевищує технологічно необхідне на величину більшу, ніж необхідна точність обчислень  $\varepsilon$ , то збільшують витрату нафти у нафтопроводі з певним кроком. Далі обчислення повторюють, розпочинаючи з розрахунку режиму роботи першої НПС при скоригованому значенні витрати нафти.

За певного значення витрати нафти у нафтопроводі на вході  $k$ -ої НПС тиск нафти з точністю  $\varepsilon$  стає рівним мінімально допустимому тиску із умови безкавітаційної роботи насосів  $P_{\min_k}$ . Це значення витрати і буде пропускною здатністю нафтопроводу для даного варіанта його роботи та певних фізичних властивостей нафти. Ділянка нафтопроводу, що знаходиться перед  $k$ -ою НПС, є лімітуючою за даного варіанта його роботи. На всіх перегонах, що розміщені після лімітуючої ділянки, за знайденої витрати нафти буде мати місце надлишок тиску, який необхідно дроселювати. Загальний обсяг дроселювання складається із величини дроселювання для забезпечення міцності трубопроводу, та додаткового дроселювання, спричиненого наявністю лімітуючої ділянки і необхідністю забезпечення необхідних тисків на вході проміжних НПС.

Наведений вище обчислювальний алгоритм реалізований в комп'ютерній програмі, яка дає можливість опрацювати методом найменших квадратів графічні характеристики насосів за номінальної обертової частоти, з певним кроком задавати значення обертової частоти будь-якого працюючого насоса, методом ітерацій визначати пропускну здатність нафтопроводу та енерговитратність транспортування нафти з використанням насосів з регульованим приводом.

Апробацію методики виконано на ділянці вітчизняного нафтопроводу, принципову схему якої наведено на рисунку 1. Ділянки нафтопроводу між НПС мають неоднакову довжину та різні особливості профілю траси.

Зазначена експлуатаційна ділянка нафтопроводу працює зі значним недовантаженням, замість трьох послідовно з'єднаних насосів на кожній НПС зазвичай включено один магістральний насос. На НПС встановлено чотири насосні агрегати різних марок та з різними роторами.

Досліджено варіант, за якого на кожній НПС працює один магістральний насосний агрегат (МА) №1 – на НПС1, №1 – на НПС2, №1 –

на НПС3 та №2 – на НПС4. При розрахунках густину нафти приймали рівною  $\rho = 870 \text{ кг/м}^3$ , кінематичну в'язкість  $\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

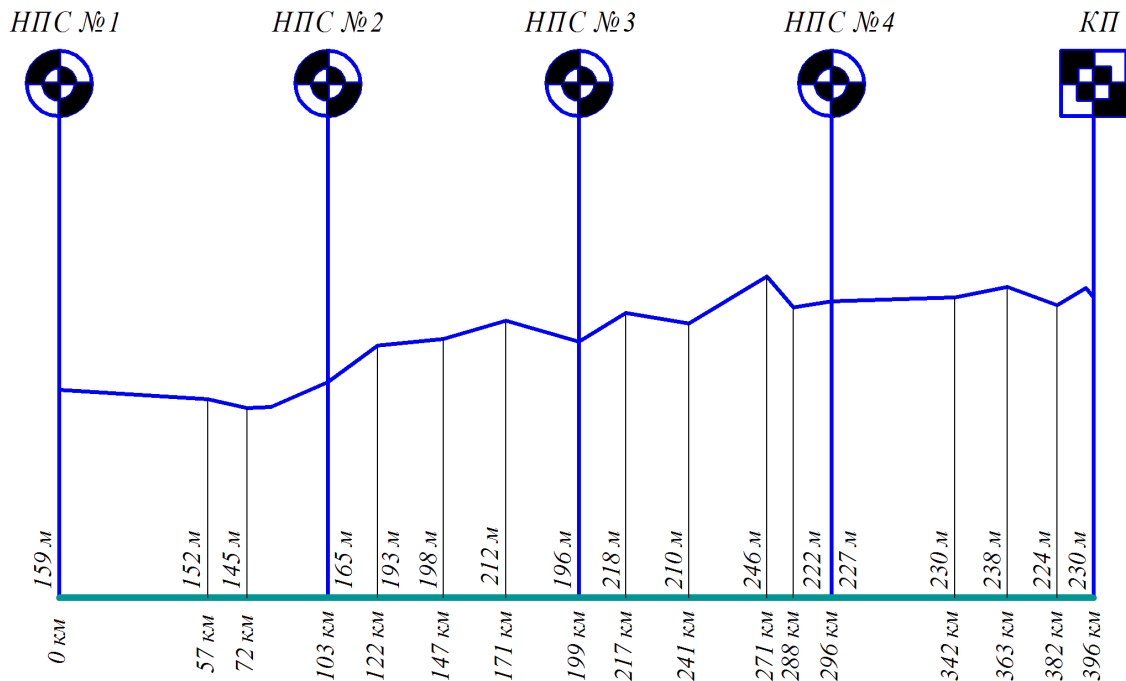


Рисунок 1 – Розрахункова схема ділянки магістрального нафтопроводу

Спочатку досліджено випадок встановлення регульованого приводу на насосі НПС1. Визначена пропускна здатність та енергетичні параметри роботи ділянки нафтопроводу в діапазоні обертової частоти 3000-1200 об/хв. Результати обчислень представлено у вигляді графічних залежностей. На рисунках 2, 3, 4 наведено залежність пропускної здатності ділянки нафтопроводу, загальної величини дроселювання і питомих витрат електроенергії від величини обертової частоти вала насоса на кожній із НПС.

Як свідчать рисунки 2-4, за номінального значення обертової частоти насоса на НПС1 3000 об/хв пропускна здатність нафтопроводу становить  $1794 \text{ м}^3/\text{год}$ , лімітуючи ділянка відсутня, тиск дроселювання дорівнює нулю, питомі витрати електроенергії на транспортування нафти становлять  $H_e = 10,54 \text{ (кВт}\cdot\text{год)} / (\text{тис.т}\cdot\text{км})$ .



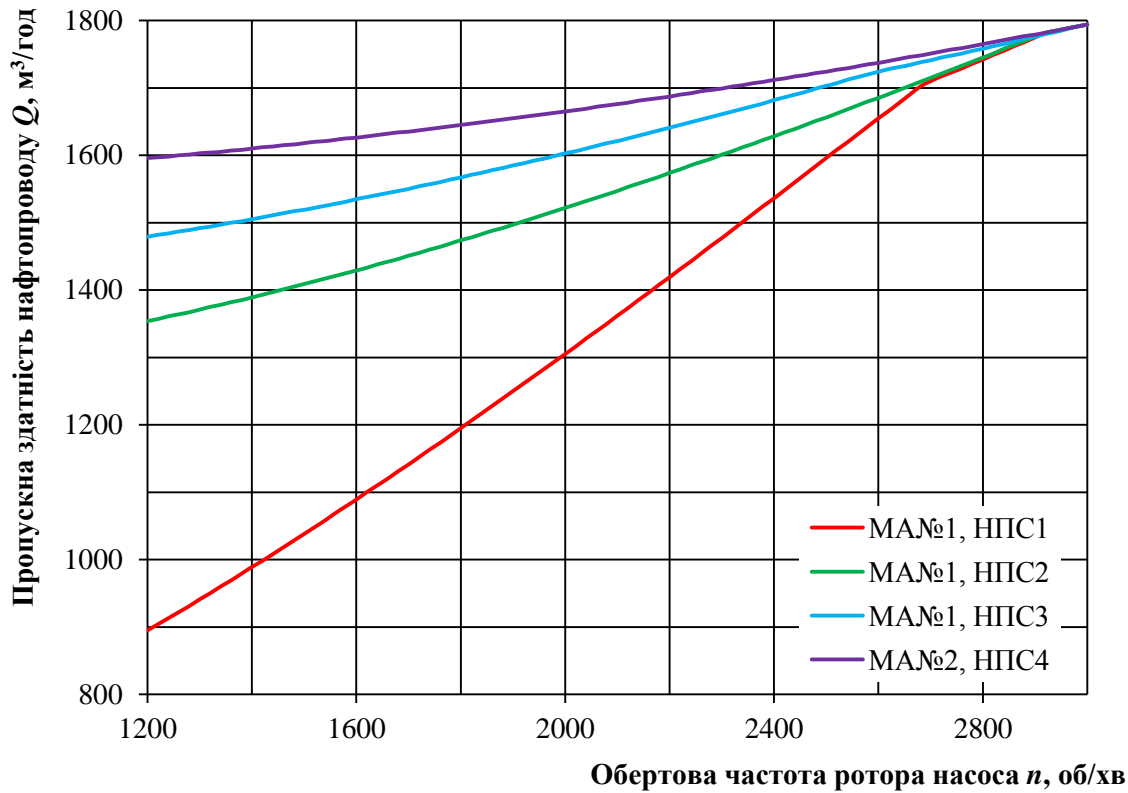


Рисунок 2 - Динаміка зміни пропускної здатності нафтопроводу залежно від обертової частоти ротора насосного агрегату на НПС

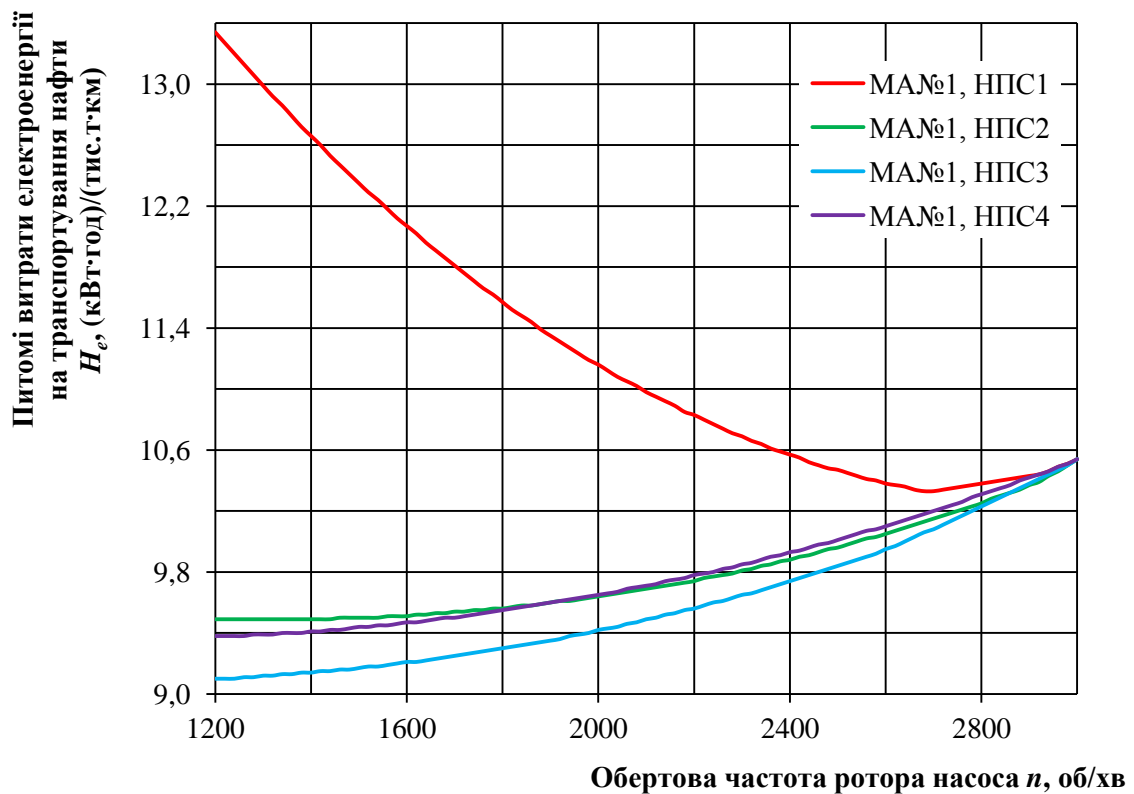


Рисунок 3 - Динаміка зміни питомих витрат електроенергії залежно від обертової частоти ротора насосного агрегату на НПС

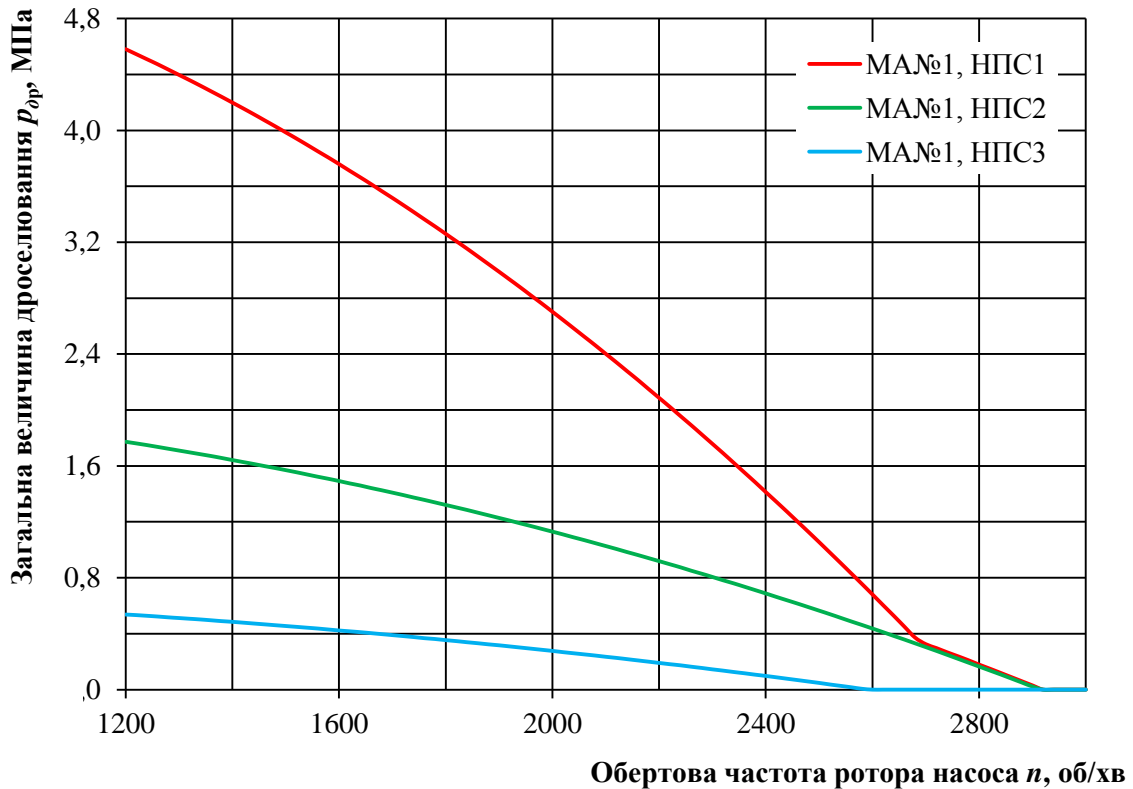


Рисунок 4 - Динаміка зміни величини дроселювання від обертової частоти ротора насосного агрегату на НПС

Зниження обертової частоти до значення 2900 об/хв зменшує пропускну здатність нафтопроводу до 1775 м<sup>3</sup>/год, тиск дроселювання дорівнює нулю, питомі витрати електроенергії на транспортування нафти зменшуються до значення  $H_e = 10,43$  (кВт·год)/(тис.т·км).

За обертової частоти 2700 об/хв пропускну здатність нафтопроводу становитиме 1710 м<sup>3</sup>/год, тиск дроселювання буде дорівнювати 0,33 МПа, питомі витрати електроенергії на транспортування нафти досягають мінімального значення  $H_e = 10,33$  (кВт·год)/(тис.т·км).

Подальше зниження обертової частоти насоса на НПС1 від 2700 до 1200 об/хв зменшує пропускну здатність нафтопроводу від 1710 до 895 м<sup>3</sup>/год, але при цьому супроводжується суттєвим зростанням дроселювання до 4,58 МПа та питомих витрат електроенергії до величини  $H_e = 13,34$  (кВт·год)/(тис.т·км).

Досліджено випадок встановлення регульованого приводу на насосі НПС2. Визначена пропускна здатність та енергетичні параметри роботи ділянки нафтопроводу в діапазоні обертової частоти 3000-1200 об/хв.

Як свідчать рисунки 2-4, зниження обертової частоти до значення 2900 об/хв зменшує пропускну здатність нафтопроводу до 1776 м<sup>3</sup>/год, тиск дроселювання дорівнює нулю, питомі витрати електроенергії зменшуються до величини  $H_e = 10,37$  (кВт·год)/(тис.т·км).

Подальше зниження обертової частоти насоса на НПС2 від 2900 до 1200 об/хв зменшує пропускну здатність нафтопроводу від 1776 до 1354 м<sup>3</sup>/год, при цьому супроводжується зростанням дроселювання до 1,77 МПа та зменшенням питомих витрат електроенергії до значення 9,49 (кВт·год)/(тис.т·км).

Результати досліджень для випадку встановлення регульованого приводу на насосі НПС3 наведено на рисунках 2, 3, 4. Як свідчать рисунки 2-4, зниження обертової частоти до значення 2600 об/хв зменшує пропускну здатність нафтопроводу до 1724 м<sup>3</sup>/год, тиск дроселювання дорівнює нулю, питомі витрати електроенергії на транспортування нафти зменшуються до значення  $H_e = 9,95$  (кВт·год)/(тис.т·км).

Подальше зниження обертової частоти насоса на НПС3 від 2600 до 1200 об/хв зменшує пропускну здатність нафтопроводу від 1724 до 1479 м<sup>3</sup>/год, супроводжується зростанням дроселювання до 0,54 МПа та зменшенням питомих витрат електроенергії до 9,10 (кВт·год)/(тис.т·км).

Аналогічні дослідження проведено для випадку встановлення регульованого приводу на насосі НПС4. На рисунках 2,3 наведено залежність пропускної здатності ділянки нафтопроводу і питомих витрат електроенергії від величини обертової частоти вала насоса на кінцевій НПС4.

Із графіків 2 і 3 випливає, що за зниження обертової частоти насоса на НПС4 від 3000 до 1200 об/хв перекачування нафти відбувається без

лімітуючої ділянки та вимушеного дроселювання, пропускна здатність нафтопроводу зменшується від 1794 до 1596 м<sup>3</sup>/год, питомі витрати електроенергії зменшуються від 10,54 до 9,38 (кВт·год)/(тис.т·км).

Виконані дослідження дали змогу зробити такі висновки щодо енергоефективності застосування одного насоса з регульованим енергоприводом на різних НПС для умов реальної нафтопровідної системи, що працює за значним недовантаженням:

- 1) використання насоса з регульованим приводом на початковій НПС1 дає змогу регулювати витрату нафти в нафтопроводі у діапазоні від 1794 до 895 м<sup>3</sup>/год. Однак режими експлуатації нафтопроводу при цьому супроводжуються неприпустимою величиною вимушеного дроселювання та значною перевитратою електроенергії. Таким чином, використання насоса з регульованим приводом на НПС1 недоцільно;
- 2) використання насоса з регульованим приводом на НПС2 дає змогу регулювати витрату нафти в нафтопроводі у діапазоні від 1794 до 1354 м<sup>3</sup>/год. Режими експлуатації нафтопроводу при цьому супроводжуються величиною вимушеного дроселювання до 1,77 МПа і зменшенням питомих витрат електроенергії до 9,49 (кВт·год)/(тис.т·км);
- 3) використання насоса з регульованим приводом на НПС3 дає змогу регулювати витрату нафти в нафтопроводі у діапазоні від 1794 до 1479 м<sup>3</sup>/год. Режими експлуатації нафтопроводу при цьому супроводжуються невеликим вимушеним дроселювання до 0,54 МПа та зменшенням питомих витрат електроенергії до 9,10 (кВт·год)/(тис.т·км);
- 4) використання насоса з регульованим приводом на кінцевій НПС4 дає змогу регулювати витрату нафти в нафтопроводі у вузькому діапазоні від 1794 до 1596 м<sup>3</sup>/год. Режими експлуатації

нафтопроводу реалізуються без дроселювання і характеризуються зменшенням питомих витрат електроенергії до 9,38 (кВт·год)/(тис·т·км);

- 5) якщо необхідно зменшити витрату нафти в діапазоні 1794 до 1600 м<sup>3</sup>/год найбільш енергоефективним варіантом є використання насоса з регульованим приводом на кінцевій НПС4;
- б) якщо необхідно зменшити витрату нафти в діапазоні 1600 до 1500 м<sup>3</sup>/год найбільш енергоефективним варіантом є використання насоса з регульованим приводом на НПС3.

Як показали дослідження, використання насосного агрегату з регульованим приводом тільки на одній НПС має обмежену сферу застосування і не завжди призводить до помітного зменшення енерговитратності трубовідного транспорту нафти.

Тому розглянуто технологію, за якої на кожній НПС модельного нафтопроводу буде працювати один магістральний насос з регульованим приводом. Визначено пропускну здатність та енергетичні параметри експлуатації нафтопроводу, що був об'єктом досліджень, у діапазоні зміни обертової частоти 3000-1200 об/хв. При цьому приймалось, що на насосних агрегатах всіх чотирьох НПС зменшення обертової частоти здійснювалось синхронно.

На рисунках 5, 6, 7 наведено залежність пропускну здатності ділянки нафтопроводу, загальної величини дроселювання і питомих витрат електроенергії від величини обертової частоти вала насосів, однакової на НПС1, НПС2, НПС3 і НПС4.

Із рисунків 5-7 випливає, що зменшення обертової частоти вала насосів від 3000 до 1200 об/хв дає змогу регулювати робочу витрату нафти в нафтопроводі у діапазоні від 1794 до 592 м<sup>3</sup>/год. При цьому загальна величина вимушеного дроселювання зростає від 0 до 0,125 МПа. Питомі витрати електроенергії на транспортування нафти нафтопроводом за зміни

обертової частоти від 3000 до 1200 об/хв монотонно зменшуються від 10,54 до 3,89 (кВт·год)/(тис.т·км).

Альтернативою використання насосів з регульованим приводом для нафтопроводу, що був об'єктом досліджень, є вибір оптимальних комбінацій працюючих насосів на НПС.

Використовуючи комп'ютерну програму, визначаємо пропускну здатність та енерговитратність нафтопроводу для різних варіантів використання трьох і менше насосів зі сталою обертовою частотою. Через значну кількість таких варіантів, у таблицю 1 зводимо лише фрагмент одержаних результатів.

Таблиця 1 - Результати розрахунку пропускну здатності та енерговитратності нафтопроводу за використання насосних агрегатів з номінальною обертовою частотою

№ з/п	Номери працюючих насосних агрегатів				Пропускна здатність, м <sup>3</sup> /год	Загальна величина дроселювання, МПа	Питомі витрати електроенергії, (кВт·год)/(тис.т·км)
	НПС1	НПС2	НПС3	НПС4			
1	1	1	1	2	1794	0	10,54
2	1	1	1	0	1580	0	9,18
3	1,2	0	1	0	1542	0,25	8,80
4	1	1	0	2	1425	0,64	9,00
5	1,2	1	0	0	1398	0	9,40
6	1	0	1	0	1273	0,08	7,00
7	1	1	0	0	1234	0	7,28
8	1,2	0	0	0	1168	0,39	6,94
9	1	0	0	0	842	0	4,63

Із таблиці 1 видно, що шляхом використання різних комбінацій працюючих насосів можна регулювати витрату нафти в нафтопроводі у діапазоні від 1580 до 842 м<sup>3</sup>/год. Для одержання витрати нафти в нафтопроводі 1580 м<sup>3</sup>/год за варіантом 2 та роботі всіх насосів зі сталою номінальною обертовою частотою питомі витрати електроенергії

становлять

9,18 (кВт·год)/(тис.т·км). У той же час при використанні насоса з регульованим приводом на НПС2 за витрати 1580 м<sup>3</sup>/год питомі витрати електроенергії становитимуть 9,38 (кВт·год)/(тис.т·км).

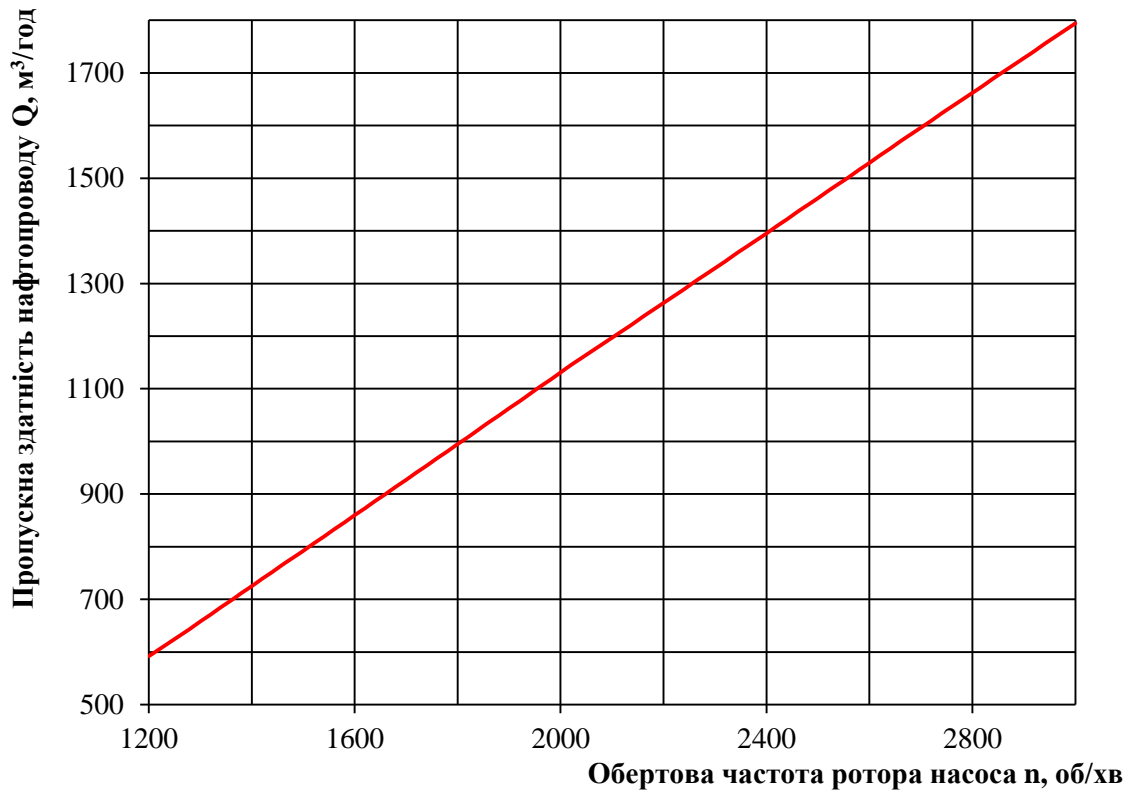


Рисунок 5 - Динаміка зміни пропускної здатності нафтопроводу залежно від обертової частоти ротора насоса, однакової на всіх НПС

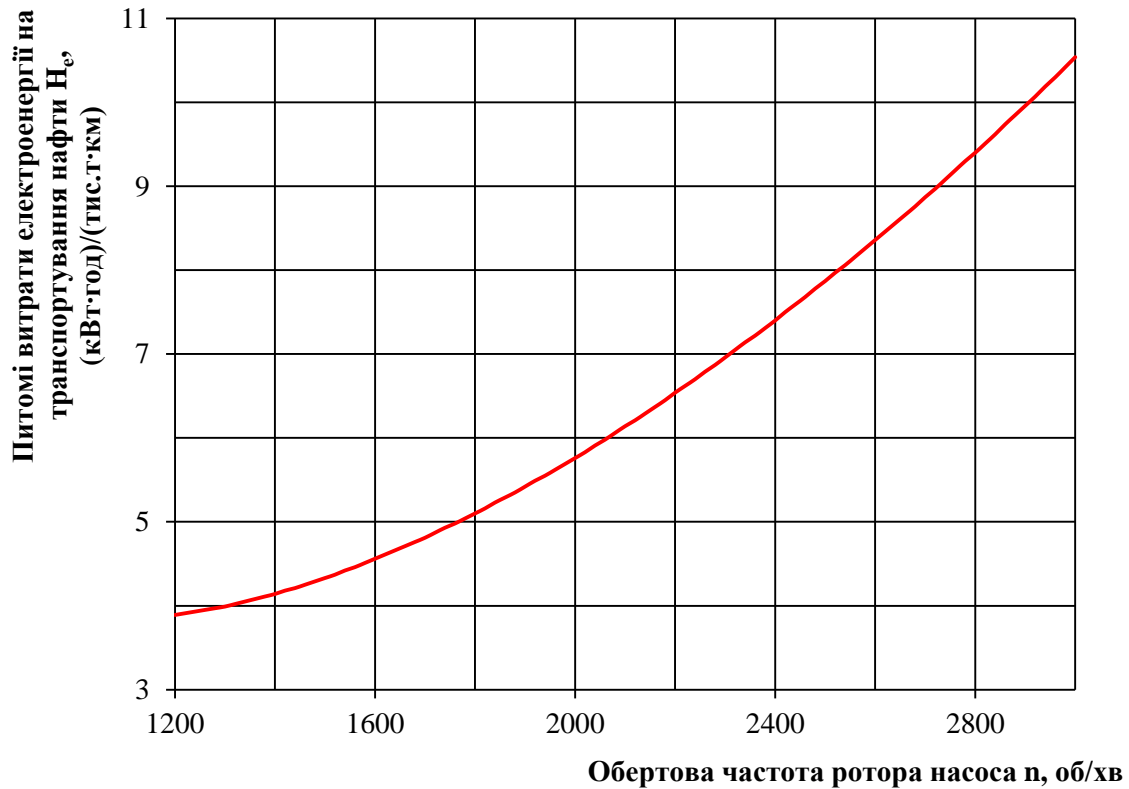


Рисунок 6 - Динаміка зміни питомих витрат електроенергії залежно від обертової частоти ротора насоса, однакової на всіх НПС

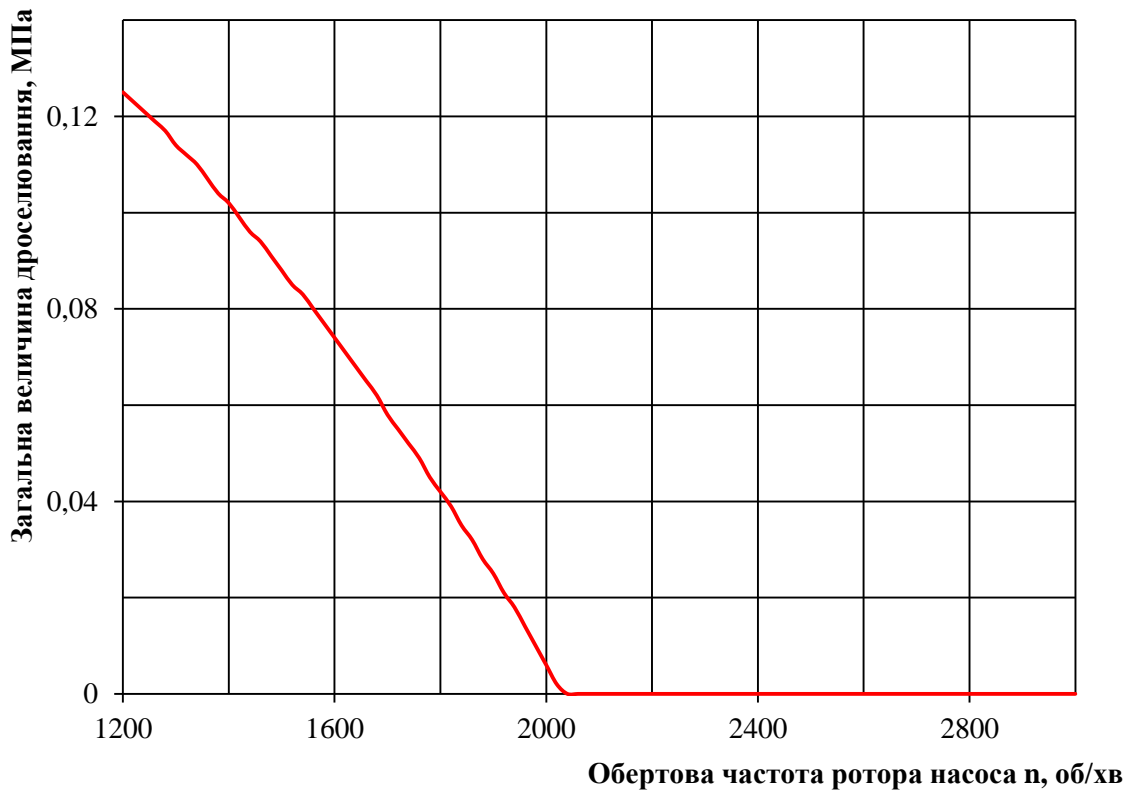


Рисунок 7 - Динаміка зміни величини дроселювання залежно від обертової частоти ротора насоса, однакової на всіх НПС



Таким чином, для нафтопроводу, що був об'єктом досліджень, використання насосів з регульованим приводом доцільно тільки для діапазонів робочих витрат нафти, які не можна забезпечити вибором комбінацій працюючих насосів на НПС.

Із таблиці 1 випливає, що одним із таких діапазонів витрат є витрати 1794-1580 м<sup>3</sup>/год. Для створення таких фіксованих витрат нафти в нафтопроводі при роботі зазначеної вище комбінації насосів необхідно застосувати вимушене дроселювання.

Використовуючи розроблену нами програму розрахунку режиму роботи нафтопроводу на фіксовану витрату, визначаємо величину вимушеного дроселювання та енерговитратність для кількох значень витрати нафти. Одержані значення заносимо у таблицю 2.

Із таблиці 2 випливає, що найвищу енергоефективність забезпечує технологія застосування насосів з регульованим приводом на всіх НПС нафтопроводу, що був об'єктом досліджень. Однак оснащення насосів регульованим приводом на всіх НПС вимагає значно більше матеріальних витрат, порівняно з варіантом оснащення насоса регульованим приводом тільки на НПС4. При цьому різниця енерговитратності для цих двох технологій невелика.

Таблиця 3 ілюструє порівняння енерговитратності різних технологій експлуатації нафтопроводу для діапазону робочих витрат транспортованої нафти 1794-1580 м<sup>3</sup>/год.

Таблиця 2 - Величина дроселювання та питомі витрати електроенергії для різних технологій експлуатації нафтопроводу

Витрата нафти у нафтопроводі, м <sup>3</sup> /год	Застосування насосів зі сталою обертовою частотою на всіх НПС			Застосування насоса з регульованим приводом на НПС4			Застосування насосів з регульованим приводом на всіх НПС		
	оберт ова часто та, об/хв	загаль на велич ина дросе	питомі витрати електроен ергії, (кВт·год)/	оберт ова часто та, об/хв	загаль на велич ина дросе	питомі витрати електроен ергії, (кВт·год)/	оберт ова часто та, об/хв	загаль на велич ина дросе	питомі витрати електроен ергії, (кВт·год)/

		лю- вання, МПа	(тис.т·км)		лю- вання, МПа	(тис.т·км)		лю- вання, МПа	(тис.т·км)
1794	3000	0	10,54	-	-	-	-	-	-
1750	3000	0,41	10,69	2700	0	10,20	2940	0	10,19
1700	3000	0,87	10,88	2300	0	9,85	2860	0	9,74
1650	3000	1,31	11,08	1850	0	9,57	2780	0	9,30
1600	3000	1,83	11,28	1260	0	9,38	2700	0	8,87

Використовуючи дані таблиці 2 і чинні тарифи на електроенергію для підприємств, можна обчислити економію коштів на оплату електроенергії за умови, що є необхідність підтримувати у нафтопроводі тривалий час витрату нафти в діапазоні 1794-1580 м<sup>3</sup>/год.

Таблиця 3 - Порівняння енерговитратності різних технологій експлуатації нафтопроводу

Витрата нафти у нафтопроводі, м <sup>3</sup> /год	Порівняння енерговитратності транспортування нафти за використання насосів зі сталою обертовою частотою та за використання насоса з регульованим приводом на НПС4		Порівняння енерговитратності транспортування нафти за використання насосів зі сталою обертовою частотою та за використання насосів з регульованим приводом на всіх НПС	
	Зменшення питомих витрат електроенергії, (кВт·год)/(тис.т·км)	Річна економія витрат електроенергії, млн.(кВт·год)/рік	Зменшення питомих витрат електроенергії, (кВт·год)/(тис.т·км)	Річна економія витрат електроенергії, млн.(кВт·год)/рік
1750	0,49	2,60	0,50	2,65
1700	1,03	5,29	1,14	5,85
1650	1,51	7,17	1,78	8,86
1600	1,90	9,18	2,41	11,64

Аналогічно можна виявити інші діапазони витрат нафти в нафтопроводі, для створення яких доцільно використовувати насоси з регульованим приводом.

Підсумовуючи викладене вище, можна зробити такий висновок. Для встановлення енергоефективності застосування насосів з регульованим приводом на конкретному нафтопроводі, що працює за значним недовантаженням, необхідно:

- визначити пропускну здатність, величину дроселювання та питомі витрати електроенергії для всіх можливих комбінацій включення насосів на НПС;
- відповідно до перспективних планів транспортування нафти нафтопроводом встановити робочі витрати нафти, які необхідно забезпечувати тривалий час;
- встановити, які значення робочих витрат нафти не можна забезпечити в нафтопроводі вибором відповідної комбінації включення насосів на НПС;
- розрахувати режимні та енергетичні параметри роботи нафтопроводу із вимушеним дроселюванням за тих витрат нафти, які необхідно забезпечувати;
- за методикою, наведеною вище, визначити оптимальну кількість і місце встановлення насосів з регульованим приводом, обчислити економію вартості електроенергії та порівняти із витратами на облаштування насосів відповідними пристроями.

### *Література*

1. Середюк М. Д. Трубопровідний транспорт нафти і нафтопродуктів / М. Д. Середюк, Й.В. Якимів, В.П. Лісафін: [підручник для ВНЗ]. – Івано-Франківськ. 2002. – 517 с.
2. Колпаков Л. Г. Центробежные насосы магистральных нефтепроводов / Л. Г. Колпаков. – М.: Недра. 1985. – 183 с.
3. Лурье М. В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа / М. В. Лурье. – М.: Нефть и газ, 2003. – 335 с.
4. Колпаков Л. Г. Эксплуатация магистральных центробежных насосов / Л. Г. Колпаков. – Уфа: Уфимский нефтяной институт. 1988. – 116 с.

5. РД 39-014-90. Методика расчета оптимального режима отдельных насосных станций и в целом участка магистрального нефтепровода и нефтепродуктопровода с законченным технологическим циклом при применении регулируемых насосных агрегатов. Уфа: ВНИИСПТнефть. 1990. – 64 с.
6. Середюк М. Д. Методика нормування витрат електроенергії на транспортування нафти магістральними нафтопроводами / М. Д. Середюк // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2002. – №2(3). – С. 57-60.